

На правах рукописи

Ахмедшина Екатерина Николаевна

**Методы управления откликами штарковского и стимулированного
фотонного эха**

01.04.05-оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Казань-2015

Работа выполнена на кафедре образовательных технологий в физике ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) Федеральный Университет»

Научный руководитель:

Нефедьев Леонид Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой образовательных технологий в физике Института физики КФУ

Официальные оппоненты:

Гадомский Олег Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор по специальности «Оптика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск, профессор кафедры радиофизики и электроники.

Андрианов Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, Институт перспективных исследований Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, заведующий центром квантовой информатики и коммуникаций.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева», г. Казань

Защита состоится «17» декабря 2015 г. в 15²⁰ на заседании Диссертационного совета Д 212.081.07 при ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 16а, ауд.110 Института физики.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета (г. Казань, ул. Кремлевская, д.35). Электронная версия размещена на официальных сайтах ВАК при Министерстве образования и науки РФ (vak2.ed.gov.ru) и Казанского (Приволжского) федерального университета kpfu.ru.

Автореферат разослан «__»_____ 2015 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

д. ф.-м. н., профессор

Камалова Д.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Непрерывный рост потока информации, который необходимо передавать и обрабатывать, стимулирует исследования по оптической обработке информации, которые имеют перспективные возможности по созданию быстродействующих оптических процессоров. В связи с этим ведутся интенсивные разработки оптических запоминающих устройств (ОЗУ) и процессоров на основе фотонного эха. Создание ОЗУ на основе фотонного эха требует разработки физических принципов их функционирования, что включает в себя: 1) оптимизацию методов записи и считывания информации, 2) выявление оптимальных условий хранения информации и 3) разработку методов стирания записанной информации. Для стирания информации предлагались различные методы, основанные на устранении пространственно-частотной модуляции населенности резонансных уровней путем воздействия на систему определенной последовательностью оптических импульсов. Однако все предложенные схемы стирания информации довольно сложны для их технического воплощения. Кроме того, процесс стирания информации оказывается энергетически невыгодным, так как для его осуществления необходима энергия такого же порядка, что и для записи информации. С этой точки зрения более выгодным может оказаться не стирание, а «запирание» эхо-голографической информации, что означает создание таких условий, при которых информация не может проявиться в виде оптического отклика резонансной среды. Это можно осуществить путем нарушения частотно-временной корреляции неоднородного уширения резонансной линии на различных временных интервалах. Даже небольшое нарушение частотно-временной корреляции неоднородного уширения резонансной линии должно приводить к значительному ослаблению интенсивности отклика. Этого эффекта можно достичь путём воздействия на резонансную среду на разных временных интервалах пространственно-неоднородными внешними возмущениями, приводящими к случайным сдвигам или расщеплениям исходных монохромат неоднородно уширенной линии. В качестве таких возмущений может быть выбрано воздействие на резонансную среду пространственно-неоднородного электрического поля (линейный или квадратичный эффект Штарка), стоячей электромагнитной волны или бегущей электромагнитной волны с искусственно созданной пространственной неоднородностью (динамический эффект Штарка).

При возбуждении узкой частотной области в неоднородно уширенной линии резонансного перехода внешние пространственно – неоднородные электромагнитные поля могут приводить к созданию искусственного неоднородного уширения, которым можно управлять. Это приводит к возможности управления временем появления отклика эха в нановременном диапазоне.

Таким образом, является актуальным изучение особенностей формирования переходных оптических процессов при наличии внешних пространственно-неоднородных электромагнитных полей и их применения в оптических эхо-процессорах.

Фазовая память резонансной системы является определяющим фактором при формировании оптических переходных процессов. Для ее описания используется коэффициент частотно-временной корреляции неоднородного уширения. Уменьшение величины такой корреляции приводит к значительному уменьшению интенсивности отклика системы на когерентные лазерные воздействия. Поэтому является **актуальным** изучение влияния на частотно-временную корреляцию неоднородного уширения различных внешних возмущений резонансной системы и процессов, которые происходят внутри резонансной системы.

Процесс формирования штарковского эха отличается от процесса формирования первичного фотонного эха (ПФЭ). Его изучение является актуальным в связи с тем, что оно может быть использовано для создания квантовой памяти на основе градиентного эха. Ее основным преимуществом является возможность записи и считывания квантовых состояний без использования дополнительных лазерных импульсов, контролирующих систему, что существенно упрощает постановку эксперимента.

Таким образом, является **актуальным** изучение различных методов управления откликами штарковского эха и применение его для определения необратимой поперечной релаксации резонансной системы в целях когерентной спектроскопии.

Целью диссертационной работы являлось изучение эффектов, возникающих при воздействии на среду пространственно-неоднородных электромагнитных полей и их влияние на процессы формирования штарковского (градиентного) и стимулированного фотонного эха (СФЭ);

Научная новизна работы

1. Впервые показано, что при формировании штарковского (градиентного) эха наблюдается эффект корреляции временной формы объектного лазерного импульса и отклика штарковского эха.
2. Впервые рассмотрена частотно-временная корреляция изохромат неоднородно уширенной линии, подвергшихся лазерному возбуждению при наличии внешних пространственно-неоднородных электрических полей или нерезонансных лазерных импульсов с искусственно созданной пространственной неоднородностью.
3. Впервые изучена частотно-временная корреляция неоднородного уширения в газе при наличии упругих столкновений частиц с изменением скорости.

4. Установлено, что воспроизводимость информации в отклике штарковского (градиентного) эха, заложенной во временную форму объектного лазерного импульса, существенно зависит от взаимной ориентации внешних пространственно-неоднородных электрических полей.

5. Развита методы управления сигналами штарковского (градиентного) эха в нановременном диапазоне внешними пространственно-неоднородными электромагнитными полями.

6. Развита способ определения поперечной необратимой релаксации резонансной системы по времени появления сигналов штарковского (градиентного) эха.

Практическая ценность работы

Результаты исследований могут находить практическое применение при создании устройств оптической памяти и эхо-процессоров, а также в когерентной оптической эхо-спектроскопии. Методы управления временем появления штарковского эха могут быть использованы для задержки импульсов отклика. Штарковское эхо может быть применено для определения времени релаксации. Влияние столкновений с изменением скорости частиц в газе на форму отклика стимулированного фотонного эха могут привести к разрушению записываемой информации в газовых средах. Практическая значимость работы заключается также в получении результатов, которые могут быть применимы для разработки устройств оптической памяти, многоканальной записи информации, а также для использования в эхо-процессорах.

Защищаемые положения

1. Оптимальными условиями формирования штарковского эха являются неколлинеарность градиентов внешних пространственно-неоднородных электрических полей, значение коэффициента частотно-временной корреляции неоднородного уширения $R = -1$, площадь объектного лазерного импульса $\theta \ll \pi$, величина градиентов внешних пространственно-неоднородных электрических полей около 30 В/см^2 .

2. Упругие столкновения с изменением скорости частиц в газе при давлении больше 1,5 Торр и температуре $T=800\text{K}$ приводят к изменению временной формы отклика стимулированного фотонного эха.

3. Время появления штарковского эха в нановременном диапазоне зависит от соотношения напряженностей внешних пространственно-неоднородных электромагнитных полей.

4. Предложенный способ определения коротких времен релаксации в нановременном диапазоне по времени появления отклика штарковского эха является более точным по сравнению с определением времени релаксации по спаду интенсивности.

Апробация основных результатов

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих международных конференциях: VII Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика - 2011» (г. Санкт-Петербург, 2011г.), XV Международная молодежная научная школа «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (г. Казань, 2011г.), I Международная научно-практическая конференция «Научная дискуссия: вопросы физики, математики, информатики» (г. Москва, 2012г.), I Международная научно-практическая конференция: «Научная дискуссия: инновации в современном мире» (г. Москва, май 2012г.), Международная научно-практическая конференция «Наука и образование в XXI веке» (г. Тамбов, 2012 г.), Международная научная конференция "Актуальные вопросы современной науки" (г. Санкт-Петербург, 2012г.), Международная научно-практическая конференция «Физико-математические науки и информационные технологии: актуальные проблемы» (г. Новосибирск, 2012г.), VII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (г. Санкт-Петербург, 2012г.), XVI Всероссийская молодежная научная школа «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (г. Казань, 2012г.), International scientific conference 2nd «Science, technology and higher education», (Westwood, Canada 2012г.), International conference 3rd «Science and education» (Germany, 2012г.), VIII Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика - 2013» (г. Санкт-Петербург, 2013г.), XVIII Международная молодежная научная школа «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (г. Казань, 2014г.), VIII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» ФПО-2014 (г. Санкт-Петербург, 2014 г.), XII Международные чтения по квантовой оптике (IWQO-2015) (г. Москва-Троицк, 2015г.)

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 24 печатных работах, в том числе 10 печатных работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Список публикаций приведен в разделе «Список литературы».

Личный вклад автора

Диссертант вместе с научным руководителем участвовал в постановке и решении задач, обсуждении полученных результатов. Основные результаты и их интерпретация выполнены автором лично или при его непосредственном участии.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 124 страницах текста, включая 51 рисунок и список литературы из 70 наименований.

В первой главе изложен краткий обзор, в котором описаны процессы формирования оптических переходных явлений при наличии внешних пространственно-неоднородных электромагнитных полей. Рассмотрена фазовая память и частотно-временная корреляция неоднородного уширения, стирание информации и эффект «запирания» сигналов фотонного эха, а также штарковское (градиентное) эхо. Проведен анализ современного состояния работ по созданию устройств памяти и оптических эхо-процессоров.

Во второй главе рассматривается фазовая память системы, т.к. она является определяющим фактором при формировании оптических переходных процессов. Для описания разновидностей фазовой памяти вводится коэффициент частотно-временной корреляции изохромат неоднородно уширенной линии на разных временных интервалах. В данной работе рассматривается два вида фазовой памяти: 1) фазовая память при искусственно созданном неоднородном уширении внешними пространственно-неоднородными электромагнитными полями; 2) фазовая память, связанная с взаимным соответствием изохромат неоднородно уширенной линии на разных временных интервалах.

Примером первого вида фазовой памяти является случай, когда на среду воздействуют пространственно-неоднородные электромагнитные поля. Внешние пространственно-неоднородные электромагнитные поля могут приводить к созданию искусственного неоднородного уширения, которым можно управлять. Это приводит к возможности управления временем появления отклика эха в нановременном диапазоне. В качестве модели возбуждения СФЭ и штарковского эха были выбраны случаи, когда $\sigma' \ll \sigma$, где σ - ширина неоднородно уширенной линии, σ' - ширина области ее возбуждения первым объектным лазерным импульсом.

При воздействии пространственно-неоднородного электрического поля на временном интервале $\Delta\tau$ каждый j -й оптический центр, принадлежащий данной изохромате, получает дополнительный частотный сдвиг $f(\Delta\tau, \Delta, \vec{r}_j)$, зависящий от его пространственного местоположения в образце:

$$f(\Delta\tau, \Delta, \vec{r}_j) = \Delta + \varepsilon(\Delta\tau, \Delta, \vec{r}_j), \quad (1)$$

где $\Delta = \omega - \Omega_0$ - сдвиг отдельной изохроматы, ω - частота лазерного излучения, Ω_0 - частота резонансного перехода, $\varepsilon(\Delta\tau, \Delta, \vec{r}_j) \approx C_{Sh} (\vec{\nabla} E(\vec{r}) \vec{r}_j)$, \vec{r}_j - радиус-вектор местоположения j -го оптического центра, C_{Sh} - постоянная эффекта Штарка.

Для описания фазовой памяти системы рассмотрена корреляция между значениями сдвигов частот отдельных оптических центров, подвергшихся лазерному возбуждению, на разных временных интервалах $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$. Матрица частотных сдвигов в этом случае будет иметь вид

$$Z = \|f(\Delta\tau_1, \Delta, \vec{r}_j), f(\Delta\tau_2, \Delta, \vec{r}_j)\|, \quad (j=1 \dots N), \quad (2)$$

где N – число оптических центров в образце.

Коэффициент частотно-временной корреляции изохромат неоднородно уширенной линии, подвергшихся лазерному возбуждению на разных временных интервалах, имеет вид [А7]

$$R(\Delta\tau_1, \Delta\tau_2) = \frac{1}{V} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{(f(\Delta\tau_1, \Delta, \vec{r}) - \bar{z}(\Delta\tau_1))(f(\Delta\tau_2, \Delta, \vec{r}) - \bar{z}(\Delta\tau_2))}{\delta^2_1(\Delta\tau_1)\delta^2_2(\Delta\tau_2)} \tilde{S}^{(1)}(\Delta) dV d\Delta, \quad (3)$$

где $\tilde{S}^{(n)}(\Delta)$ - представляет спектр огибающей n -го объектного лазерного импульса, $\bar{z}(\Delta\tau_i)$ - средние значения частотных сдвигов на временном интервале $\Delta\tau_i$, δ_i^2 - дисперсия.

В случае формирования СФЭ (рис.1) коэффициент корреляции изохромат неоднородно уширенной линии, подвергшихся лазерному возбуждению на разных временных интервалах, существенно зависит от области возбуждения σ' (рис.2).

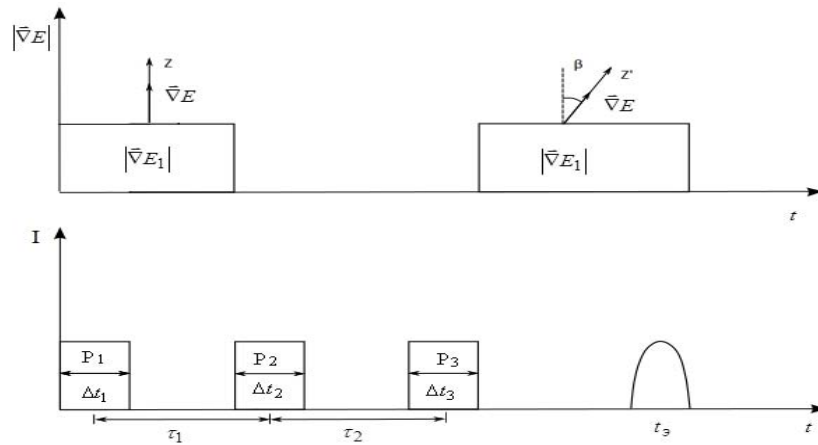
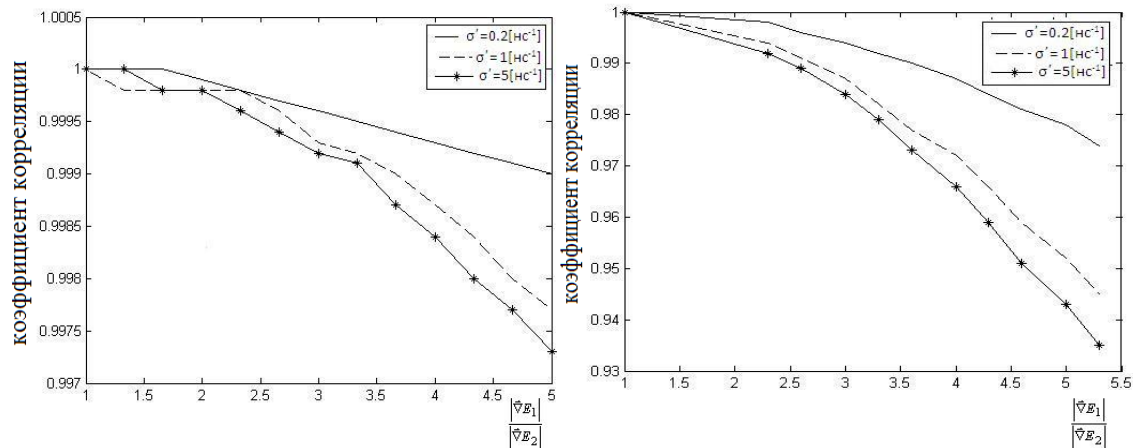


Рисунок 1 - Схема возбуждения СФЭ: P_1, P_2, P_3 – резонансные лазерные импульсы, Δt_m - длительность m -го импульса, $\Delta t_2, \Delta t_3 \ll \Delta t_1$, τ_1, τ_2 – временные интервалы между лазерными импульсами, $\vec{\nabla}E_1, \vec{\nabla}E_2$ - величины градиентов внешних пространственно-неоднородных электрических полей, I – интенсивность резонансного лазерного излучения.



а)

б)

Рисунок 2 - Зависимость коэффициента корреляции изохромат неоднородно уширенной линии, подвергшихся лазерному возбуждению при варьировании величин градиентов электрических полей $\frac{|\vec{\nabla}E_1|}{|\vec{\nabla}E_2|}$ при разных областях возбуждения неоднородно уширенной линии, $\tau = 10\text{нс}$ – длительность воздействия внешних пространственно-неоднородных электрических полей, а) $|\vec{\nabla}E_2| = 30\text{В/см}^2$, б) $|\vec{\nabla}E_2| = 150\text{В/см}^2$.

Таким образом, при увеличении отношений градиентов электрических полей коэффициент корреляции изохромат неоднородно уширенной линии, подвергшихся лазерному возбуждению уменьшается. Уменьшение коэффициента частотно-временной корреляции приводит к разрушению фазовой памяти системы, что может вызывать эффект запираания СФЭ[А 6].

Примером второго вида фазовой памяти является фазовая память в газах[1]. Она разрушается не за счет внешних воздействий, а за счет внутренних процессов. Рассматривается влияние столкновений с изменением скорости частиц молекул газа на фазовую память системы. Столкновения приводят к случайным изменениям угла между направлением наблюдения и скорости частицы, что в свою очередь приводит к случайным сдвигам частот каждой частицы (спектральная диффузия). Фотонное эхо, сформированное двумя импульсами резонансного излучения, поляризованными линейно и взаимно ортогонально, наблюдалось в работе [2] в парах иттербия ^{174}Yb на переходе $^1S_0(6s^2) - ^3P_1(6s6p)$ при следующих параметрах: давлении - $P=1$ Торр, температуре - $T=800^\circ\text{K}$.

Численный расчет коэффициента корреляции в этих условиях в нановременном диапазоне показывает в связи с тем, что равновесие не установлено, коэффициент корреляции меняется случайным образом (рис.3).

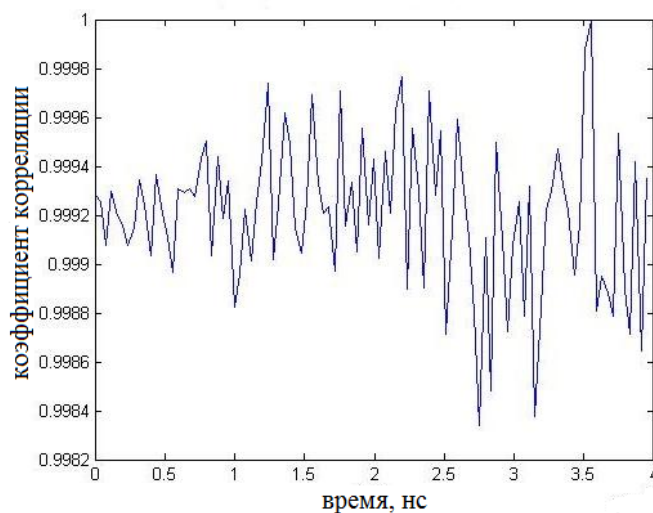


Рисунок 3 - Изменение частотно-временного коэффициента корреляции неоднородного (доплеровского) уширения в зависимости от временного интервала при наличии столкновений

Это, в свою очередь, приводит к нарушению фазовой памяти системы, что оказывает влияние на временную форму отклика СФЭ [A16], причем в каждом отдельном эксперименте по наблюдению СФЭ форма меняется.

Определены оптимальные условия формирования штарковского (градиентного) эха, т.к. оно формируется иначе, чем первичное фотонное эхо. Процесс формирования штарковского эха существенно отличается от формирования первичного фотонного эха, так как расфазировка и фазировка дипольных моментов в данном случае осуществляется внешними пространственно-неоднородными электрическими полями. При формировании первичного фотонного эха в резонансной среде формируется волна макроскопической поляризации. По окончании воздействия возбуждающего импульса амплитуда наведенной резонансной макроскопической поляризации постепенно уменьшается. Общее затухание обусловлено расфазировкой диполей, распределенных в пределах неоднородно уширенной оптической линии (затухание свободной поляризации). Воздействие на среду второго лазерного импульса приводит к сфазированию осциллирующих дипольных моментов и, следовательно, к возникновению в определенный момент времени неравновесной макроскопической поляризации среды. При этом будет излучаться оптический когерентный сигнал — фотонное эхо. При формировании штарковского эха после воздействия возбуждающего лазерного импульса внешнее пространственно неоднородное электрическое поле создает дополнительное неоднородное уширение за счет эффекта Штарка, что приводит к разным частотам прецессии дипольных моментов в объеме резонансной среды. После воздействия второго пространственно неоднородного электрического поля с градиентом, антиколлинеарным градиенту первого электрического поля, у дипольных моментов меняются угловые скорости прецессии, но направление прецессии не меняется. Иными

словами, более медленные дипольные моменты, после воздействия второго градиента электрического поля, начинают двигаться быстрее, быстрые – начинают отставать. Синхронизация дипольных моментов происходит в момент времени $t \approx 2\tau$, когда более быстрые дипольные моменты догонят более медленные. В момент синхронизации дипольных моментов происходит когерентное излучение – штарковское эхо. Корреляция неоднородного уширения в этом случае приведена на рис.4. Так как штарковское эхо формируется при условии $\beta \sim 180^\circ$, то оптимальным условием его формирования является случай $R \rightarrow -1$.

Наибольшая интенсивность отклика штарковского эха наблюдается при наименьшем или отрицательном значениях R , что связано с процессом формирования штарковского эха.

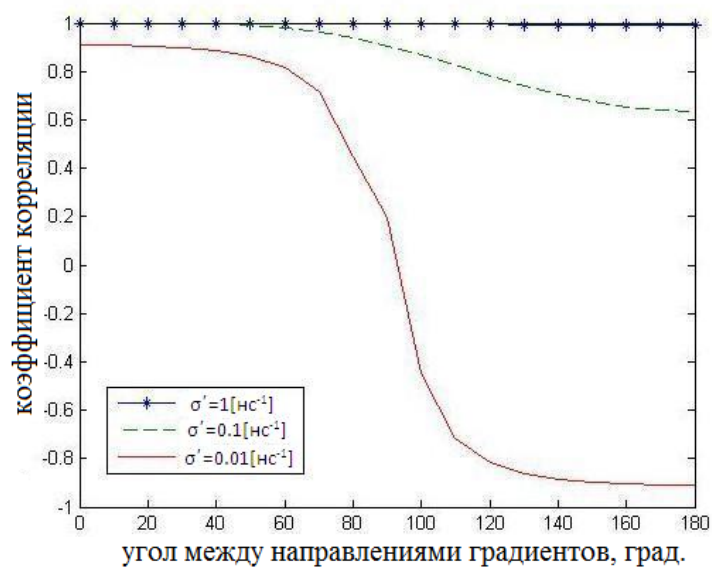


Рисунок 4 - Зависимость коэффициента частотно-временной корреляции от угла β между направлениями градиентов внешних пространственно-неоднородных электрических полей, $|\vec{\nabla} E_1| = |\vec{\nabla} E_2| = 300 \text{ В/см}^2$ – величины градиентов внешних пространственно-неоднородных электрических полей.

При $\sigma' = \sigma$ отклик штарковского эха не наблюдается, т. к. в этом случае ширина возбуждения сопоставима с естественной неоднородной шириной, при $\sigma' = 0.1 \text{ нм}^{-1}$ отклик наблюдается только при $\beta = 180^\circ$, где β – угол между направлениями градиентов электрических полей, а при $\sigma' = 0.01 \text{ нм}^{-1}$ наблюдаются отклики штарковского эха при отрицательных значениях коэффициента корреляции неоднородного уширения, начиная с угла $\beta = 100^\circ$. Результаты сопоставляются с выводами экспериментальной работы [3], в которой возбуждение неоднородно уширенной линии происходит в достаточно узком интервале частот по сравнению с ее шириной, которая в условиях эксперимента была порядка 3 ГГц, а область возбуждения ≈ 50 МГц. Это было необходимо для создания искусственного неоднородного уширения пространственно неоднородным электрическим

полем, в этом случае становится возможным наблюдение штарковского (градиентного) эха.

В третьей главе рассматривается процесс формирования штарковского (градиентного) эха и разрабатываются методы управления его откликами. Применяется математический формализм (квазиклассическое приближение) к описанию взаимодействия электромагнитного излучения с системой частиц, имеющих резонансные переходы для этого излучения, который состоит в совместном решении уравнений Максвелла и квантово-механического (материального) уравнения, в качестве которого взято уравнение для матрицы плотности. Используется полуклассический подход, который применяется для описания большинства эффектов, возникающих при взаимодействии электромагнитного излучения с системами резонансных этому излучению частиц.

Исследуется формирование штарковского (градиентного) эха при различной геометрии эксперимента, когда область возбуждения резонансным лазерным импульсом вдоль оси z $L_z \gg L_x, L_y$, где L – размер образца, L_z, L_x, L_y – размеры возбуждаемой области вдоль соответствующих осей системы координат, и когда область возбуждения – порядка размеров кристалла $L_z \approx L_x, L_y$. Выбран вид функции пространственного распределения интенсивности внешнего нерезонансного излучения $\Phi = z/L$, тогда $\vec{\nabla} \Phi = \vec{n}/L$, где \vec{n} – единичный вектор в направлении оси z . Так как $I = E^2 \cdot \Phi$, то $\vec{\nabla} I = E^2 \vec{\nabla} \Phi$ – градиент интенсивности поля нерезонансного лазерного импульса с пространственной неоднородностью. Ось z направлена вдоль первого градиента интенсивности нерезонансного лазерного излучения $\vec{\nabla} I_1$, а ось z' – вдоль второго $\vec{\nabla} I_2$.

В этих случаях при формировании штарковского эха пространственно неоднородными нерезонансными лазерными импульсами фазовая часть напряженности электрического поля отклика штарковского эха будет иметь вид [A4]

$$E \approx \frac{1}{V} \int_{-\infty}^{\infty} \int_V \exp(i \Delta t) \exp(i C_D E_{01}^2 b_z^{(1)} \tau z + E_{02}^2 b_z^{(2)} (x \sin \beta + z \cos \beta)(t - \tau)) g(\Delta) d\Delta dx dy dz, \quad (7)$$

где E_{01} и E_{02} – напряженности электрических полей нерезонансных лазерных импульсов, β – угол между направлениями градиентов интенсивностей нерезонансного лазерного излучения $\vec{\nabla} I_1$ и $\vec{\nabla} I_2$, где $b_z^{(1)}$ и $b_z^{(2)}$ – величины проекций градиентов интенсивностей нерезонансного лазерного излучения $\vec{\nabla} I_1$ и $\vec{\nabla} I_2$ на ось z ($b_z^{(2)} = -b_z^{(1)}$), C_D – постоянная динамического эффекта Штарка.

В первом случае при изменении угла β от значения 180° меняется время появления отклика штарковского эха. Причем при $\beta < 100^\circ$ и $\beta > 260^\circ$ время появления отклика быстро увеличивается (рис. 5а). Во втором случае – время появления отклика уменьшается при увеличении или уменьшении угла β от 180° (рис. 5б).

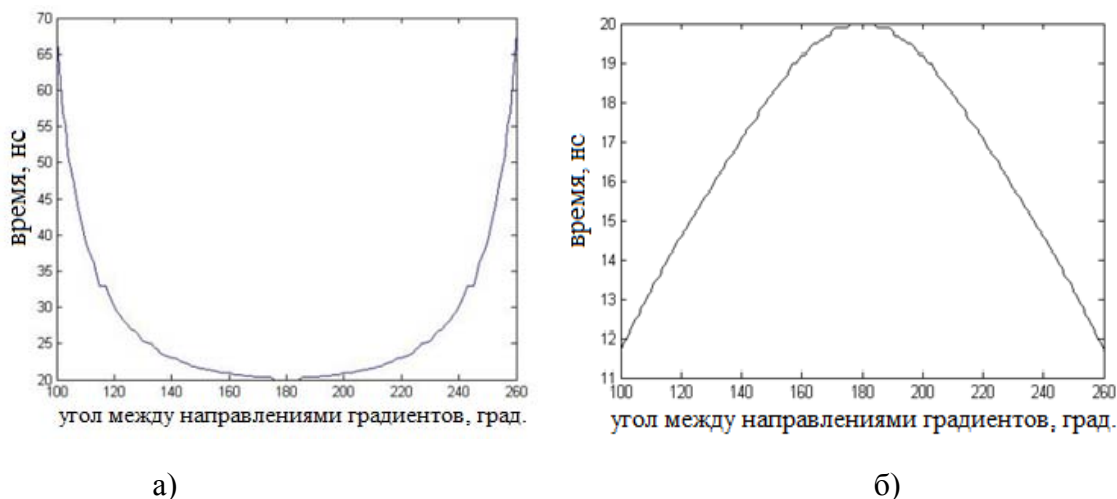


Рисунок 5 - Зависимость времени появления отклика штарковского эха от угла β между направлениями градиентов внешних пространственно неоднородных нерезонансных лазерных полей. $L_z = 1 \text{ см}$, $\tau = 10 \text{ нс}$, $C_D = 0,3 \text{ кГц}/(\text{В} \cdot \text{см}^{-1})^2$, $\vec{\nabla} I_1 = \vec{\nabla} I_2 = 5 \cdot 10^3 \text{ В}^2 / \text{см}^3$, $\sigma = 3 \text{ ГГц}$, $\sigma' = 30 \text{ МГц}$; ; а) $L_z \gg L_x, L_y$, б) $L_z \sim L_x, L_y$.

Штарковское (градиентное) эхо может быть использовано для определения релаксационных параметров резонансной среды. Формирование штарковского эха на малых интервалах в наносекундном диапазоне приводит к эффекту зависимости времени появления отклика от величины необратимой поперечной релаксации системы. Это связано с тем, что при узкой области возбуждения неоднородного уширения резонансным лазерным импульсом временная ширина отклика может быть сравнима с величиной времени релаксации, что приводит к затуханию части временного контура отклика, в результате чего наблюдается смещение времени появления штарковского эха.

Преимуществом определения коэффициентов поперечной релаксации системы с помощью сигналов штарковского (градиентного) эха является отсутствие оптических линий задержки, что необходимо при обычных экспериментах с использованием первичного фотонного эха. В случае использования нерезонансных лазерных импульсов с искусственно созданной неоднородностью можно определить время релаксации в нановременном диапазоне по времени появления отклика штарковского эха, что является более точным методом, по сравнению с определением времени релаксации по интенсивности.

В четвертой главе рассматриваются методы управления сигналами штарковского (градиентного) эха внешними пространственно-неоднородными электрическими полями. Изменение взаимной ориентации

градиентов внешних электрических полей позволяет управлять временем появления штарковского эха (рис.6), что аналогично результатам, полученным в предыдущей главе для электромагнитных полей с пространственной неоднородностью.

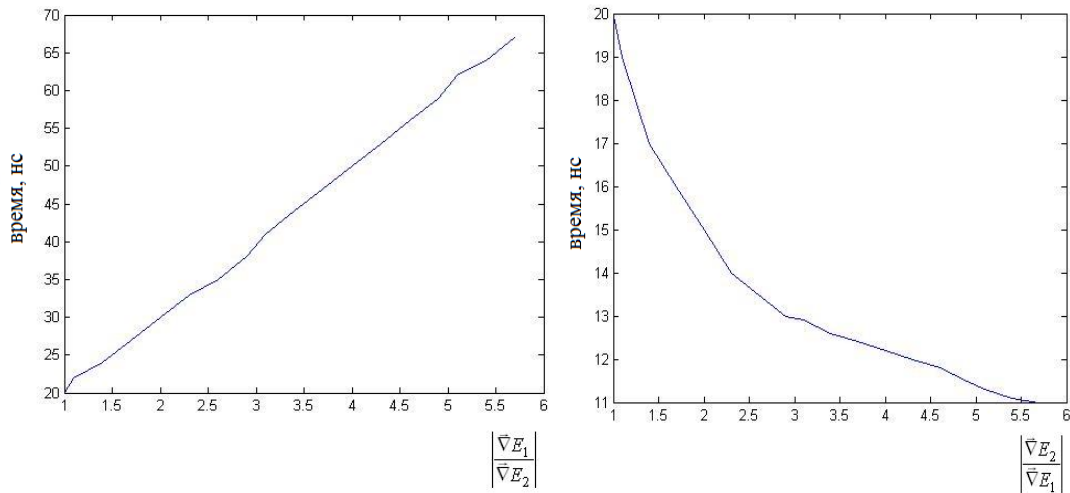


Рисунок 6 - Время появления отклика штарковского эха при изменении соотношения между величинами градиентов внешних пространственно-неоднородных электрических полей. $\tau = 10$ нс – длительность воздействия градиентов; $C_{Ш} = 35$ кГц/В·см⁻¹ – штарковский коэффициент. а) при варьировании $|\vec{\nabla} E_1|$, $|\vec{\nabla} E_2| = 35$ В/см², б) при варьировании $|\vec{\nabla} E_2|$, $|\vec{\nabla} E_1| = 35$ В/см².

При варьировании первого градиента $|\vec{\nabla} E_1|$ при фиксированном значении $|\vec{\nabla} E_2| = 35$ В/см² время появления отклика штарковского (градиентного) эха увеличивается, а при варьировании второго градиента $|\vec{\nabla} E_2|$, наоборот, уменьшается. Это означает, что путем изменения соотношения между величинами линейных градиентов электрических полей можно управлять временем появления отклика штарковского (градиентного) эха.

Эффект корреляции временной формы объектного лазерного импульса и временной формы отклика фотонного эха и СФЭ рассматривался в работах [4,5,6]. Определены оптимальные условия для воспроизведения отклика штарковского эха в случае, когда изменяются соотношения величин градиентов внешних пространственно-неоднородных электрических полей. Найдено, что при увеличении величины градиентов электрических полей происходит разрушение информации, заложенной во временную форму объектного лазерного импульса, а также смещается время появления отклика штарковского эха. Результаты сопоставляются с выводами экспериментальной работы [7], в которой была показана возможность записи и воспроизведения информации с использованием штарковского эха, где

информация была заложена во временную форму объектного лазерного импульса.

В заключении приводятся основные результаты работы:

- **установлено**, что упругие столкновения с изменением скорости частиц в газе влияют на временную форму отклика стимулированного фотонного эха;
- **исследована** частотно-временная корреляция неоднородного уширения при различных схемах возбуждения штарковского и стимулированного фотонного эха при наличии внешних пространственно-неоднородных электромагнитных полей;
- **разработаны** схемы управления временем появления откликов стимулированного фотонного эха и штарковского эха;
- **разработан** способ определения поперечной необратимой релаксации резонансной системы по времени появления сигналов штарковского эха в нановременном диапазоне;

а также сформулированы **выводы**:

1. В «малоплощадном» приближении при формировании штарковского эха наблюдается эффект корреляции временной формы объектного лазерного импульса и отклика штарковского эха.
2. Воспроизводимость информации в отклике штарковского эха, заложенной во временную форму объектного лазерного импульса, существенно зависит от взаимной ориентации внешних пространственно-неоднородных электрических полей.
3. Воздействие пространственно-неоднородных электрических полей при формировании стимулированного фотонного эха приводит к изменению частотно-временной корреляции неоднородного уширения изохромат, подвергшихся лазерному возбуждению.
4. Упругие столкновения с изменением скорости частиц в газе при давлении больше 1,5 Торр и температуре $T=800$ К приводят к изменению временной формы отклика стимулированного фотонного эха.
5. Варьирование угла между направлениями неколлинеарных градиентов интенсивностей нерезонансных лазерных полей, изменение соотношения их величин приводят к изменению времени появления отклика штарковского эха.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК:

A1. *Ахмедшина, Е.Н.* Управление во временном нанодиапазоне появлением штарковского эха путем варьирования взаимной ориентации градиентов электрических полей/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева //Журнал «НАНОСИСТЕМЫ: физика, химия, математика». – 2012. – Т. 3. - С. 71-75

A2. *Ахмедшина, Е.Н.* Формирование штарковского эха при различной взаимной ориентации внешних нерезонансных лазерных полей с пространственной неоднородностью/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева // Оптический журнал. – 2012.- Т. 79. - С. 3-7

A3. *Ахмедшина, Е.Н.* Влияние интенсивностей неоднородных электромагнитных полей на формирование штарковского эха/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева// Журнал прикладной спектроскопии. -2012.- Т. 79. –С. 834-837

A4. *Ахмедшина, Е.Н.* Влияние релаксационных процессов на интенсивность штарковского эха при наличии нерезонансных лазерных импульсов с пространственной неоднородностью/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева// Журнал прикладной спектроскопии.-2013.- Т.80.- С. 300-304

A5. *Ahmedshina, E.N.* The management of response time of shtark echo and its intensity in the presence on non resonant laser pulses with spatial inhomogeneity/**E.N. Ahmedshina**, L.A. Nefed'ev, G.I. Garnaeva, E.I. Nakimzyanova // Laser Physics. -2013. – V. 23. – P. 055203-055207.

A6. *Ахмедшина, Е.Н.* Эффективность запираания стимулированного фотонного эха в трехуровневой системе в зависимости от взаимной ориентации стоячих волн нерезонансных лазерных импульсов/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева //Журнал Прикладной Спектроскопии. – 2014. - Т.81. – С. 476-479

A7. *Ахмедшина, Е.Н.* Частотно-временная корреляция неоднородного уширения при различных режимах возбуждения стимулированного фотонного эха/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева, Э.И. Хакимзянова// Журнал Прикладной Спектроскопии. – 2014. - Т.81. – С. 856-860

A8. *Ахмедшина, Е.Н.* Частотно-временная корреляция неоднородного уширения резонансной линии и эффективность запираания информации при различных схемах возбуждения стимулированного фотонного эха/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева, А.Р. Сахбиева// Оптический журнал. -2014. - Т. 81. – С.7-12

A9. *Ахмедшина, Е.Н.* Влияние столкновений с изменением скорости частиц газа на форму стимулированного фотонного эха/ **Е.Н. Ахмедшина**,

Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева// Журнал Прикладной Спектроскопии. – 2015. - Т.82. - С.646-649

А10. *Ахмедшина, Е.Н.* Двухчастотная запись информации в трехуровневой системе с использованием стимулированного фотонного эха / **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева, Р.Н. Гарнаев // Квантовая электроника. - 2015. - Т. 45. - С. 668-671

Тезисы докладов на научных конференциях:

А11. *Ахмедшина, Е.Н.* Управление сигналом штарковского эха путем изменения пространственной ориентации градиентов внешних электрических полей/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева// Сборник трудов VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2011», Санкт-Петербург, Россия. -2011. – С.225-228

А12. *Ахмедшина, Е.Н.* Формирование штарковского эха при наличии взаимной ориентации градиентов электрических полей/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева// Сборник статей XV Международной молодежной научной школы «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия», Казань, Россия.-2011. – С. 16-20

А13. *Ахмедшина, Е.Н.* Управление временем появления штарковского эха нерезонансными лазерными импульсами с пространственной неоднородностью/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева, Э.И. Хакимзянова// I Международная научно-практическая конференция «Научная дискуссия: вопросы физики, математики, информатики», Москва, Россия.-2012. –С. 13-20

А14. *Ахмедшина, Е.Н.* Формирование сигналов штарковского эха при наличии пространственно неоднородных электрических полей/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева, Э.И. Хакимзянова // I Международная научно-практическая конференция: «Научная дискуссия: инновации в современном мире» (секция: физико-математические науки), Москва, Россия. – 2012.-С.13-20

А15. *Ахмедшина, Е.Н.* Определение времени необратимой релаксации системы с помощью штарковского эха/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева, Э.И. Хакимзянова// Международная научно-практическая конференция «Наука и образование в XXI веке», Тамбов, Россия. – 2012.- С.31-32

А16. *Ахмедшина, Е.Н.* Влияние релаксационных процессов на формирование откликов двухуровневой системе при ее возбуждении резонансным и нерезонансным лазерными импульсами/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева, Э.И. Хакимзянова// Международная научная конференция «Актуальные вопросы современной науки» секция: физические науки, Санкт-Петербург, Россия.- 2012.- С.8-14

A17. *Ахмедшина, Е.Н.* Условия возникновения откликов двухуровневой системы на воздействие одного лазерного импульса и двух нерезонансных электромагнитных стоячих волн / **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А.Нефедьев, Г.И. Гарнаева, Э.И. Хакимзянова //Международная научно-практическая конференция «физико-математические науки и информационные технологии: актуальные проблемы», Новосибирск, Россия. - 2012.- С.97-101

A18. *Ахмедшина, Е.Н.* Формирование сигналов двухуровневой системы при ее возбуждении резонансным и нерезонансным лазерными импульсами/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А.Нефедьев, Г.И. Гарнаева //VII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» ФПО-2012, Санкт-Петербург, Россия. – 2012.- С. 52-54

A19. *Ахмедшина, Е.Н.* К возможности использования штарковского эха для определения релаксационных параметров резонансной среды/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А.Нефедьев, Г.И. Гарнаева// Шестнадцатая Всероссийская Молодежная Научная Школа по когерентной оптике и оптической спектроскопии, Казань, Россия. – 2012.- С.48-52

A20. *Ahmedshina, E.N.* The management of stimulated photon echo time response in the three-level system / **E.N. Ahmedshina**, L.A. Nefed'ev, G.I. Garnaeva, E.I. Hakimzyanova, E.I. Nizamova, A.R. Sakhibieva// International scientific conference 2nd «Science, Technology and Higher Education», Westwood, Canada. – 2013. – P.80-85

A21. *Ahmedshina, E.N.* The locking information effect in three-level system under different information coding/ **E.N. Ahmedshina**, L.A. Nefed'ev, G.I. Garnaeva, E.I. Hakimzyanova, E.I. Nizamova, A.R. Sakhibieva // International conference 3rd «Science and education», Munich, Germany. - 2013. – P. 29-38

A22. *Ахмедшина, Е.Н.* Эффект «запирания» сигналов стимулированного фотонного эха при наличии импульсов внешних нерезонансных стоячих волн/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А.Нефедьев, Г.И. Гарнаева// VIII Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика – 2013», Санкт-Петербург, Россия. – 2013. – С. 124-126

A23. *Ахмедшина, Е.Н.* Влияние столкновений частиц с изменением скорости на частотно-временную корреляцию неоднородного (доплеровского) уширения в газах// **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева// Сборник статей XVIII Международной молодежной научной школы «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия», Казань, Россия. – 2014. – С. 44-48

A24. *Ахмедшина, Е.Н.* Управление временем появления штарковского эха пространственно-неоднородными электрическими полями/ **Е.Н. Ахмедшина**, Л.А. Нефедьев, Г.И. Гарнаева// Сборник статей XII Международные чтения по квантовой оптике, Москва-Троицк, Россия. - 2015. – С.155-157

Цитированная литература

1. Евсеев, И.В. Фотонное эхо и фазовая память в газах/И.В. Евсеев, Н.Н. Рубцова, В.В. Самарцев. - Казань: КГУ, 2009. – 486 с.
2. Rubtsova, N.N. Non-Faraday rotation of photon-echo polarization in ytterbium vapor/N.N. Rubtsova, V.N. Ishchenko, E.B. Khvorostov, S.A. Kochubei, V.A. Rechetov, I.V. Yevseyev//Phys. Rev.A. – 2004. – V. 70, №2. – P. 023403/1 -023403/10
3. Alexander, A. L. Photon Echoes Produced by Switching Electric Fields/ A. L. Alexander, J. J. Longdell, M. J. Sellars, N. B. Manson// Phys. Rev. Lett. – 2006. –V.96. – 043602
4. Нефедьев, Л.А. Корреляция неоднородного уширения и эффективность запираания информации в оптических эхо-процессорах /Л.А.Нефедьев, Г.И. Хакимзянова (Гарнаева)//Оптика и спектроскопия.-2005. - Т.98, №1. – С.41-45
5. Зуйков, В.А. Корреляция формы сигналов светового эха с формой возбуждающих импульсов/ В.А. Зуйков, В.В.Самарцев, Р.Г. Усманов // Письма в ЖЭТФ. – 1980. – Т. 32, № 4. – С. 293-297
6. Нефедьев, Л.А. Оптимальные условия корреляции временной формы объектного импульса с откликом стимулированного фотонного эха при наличии внешних неоднородных электрических полей/ Л.А. Нефедьев, Э.И. Хакимзянова, Г.И. Гарнаева //Оптика и спектроскопия. -2013. – Т.115, №6. – С.109-113.
7. Sellars, M.J. // Light storage using gradient Stark echoes/ M.J. Sellars, A.L. Alexander, J.J. Longdell, G. Hetet, P. K. Lam// OSA/SL. - 2007.